

УДК 621.311

**О. М. ДОВГАЛЮК, П. І. БЕЗКОСТНИЙ****ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ВПРОВАДЖЕННЯ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ В УКРАЇНІ ТА ЇХ ВПЛИВУ НА РОБОТУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ**

Розглянуто світові тенденції в розвитку геліоенергетики, виявлені основні фактори, що стимулюють впровадження і подальший розвиток геліоенергетики в Україні. Розглянуто напрямки використання сонячної енергії та способи її перетворення в теплову і електричну. Виконано аналіз потенціалу, умов і особливостей розвитку сонячної енергетики в Україні на сьогоднішній день. Виділено основні напрямки і перспективи подальшого розвитку сонячної енергетики України. Запропоновано методику оцінки економічної ефективності використання сонячних електростанцій, яка дозволяє кількісно оцінити можливості використання сонячної енергії. Розроблено алгоритм вибору структури та комплектації сонячних електростанцій.

**Ключові слова:** сонячна енергія, геліосистема, фотоелектричні модулі, електрична енергія, сонячні колектори, «зелений» тариф, коефіцієнт ефективності, термін окупності.

**О. Н. ДОВГАЛЮК, П. И. БЕЗКОСТНЫЙ****ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ВНЕДРЕНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ В УКРАИНЕ И ИХ ВЛИЯНИЯ НА РАБОТУ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Рассмотрены мировые тенденции в развитии гелиоэнергетики, выявлены основные факторы, стимулирующие внедрение и дальнейшее развитие гелиоэнергетики в Украине. Рассмотрены направления использования солнечной энергии и способы ее преобразования в тепловую и электрическую. Выполнен анализ потенциала, условий и особенностей развития солнечной энергетики в Украине на сегодняшний день. Выделены основные направления и перспективы дальнейшего развития солнечной энергетики Украины. Предложена методика оценки экономической эффективности использования солнечных электростанций, которая позволяет количественно оценить возможности использования солнечной энергии. Разработан алгоритм выбора структуры и комплектации солнечных электростанций.

**Ключевые слова:** солнечная энергия, гелиосистема, фотоэлектрические модули, электрическая энергия, солнечные коллекторы, «зеленый» тариф, коэффициент эффективности, срок окупаемости.

**О. М. DOVGALYUK, P. I. BEZKOSTNYI****INVESTIGATION OF THE PECULIARITIES OF THE SOLAR POWER PLANTS IMPLEMENTATION IN UKRAINE AND THEIR IMPACT ON THE WORK OF POWER SYSTEMS**

The world trends in the development of solar energy are considered, the main factors stimulating the introduction and further development of solar energy in Ukraine are revealed. The directions of using solar energy and ways of its transformation into thermal and electric are considered. The analysis of the potential, conditions and peculiarities of solar energy development in Ukraine for today is carried out. The main directions and prospects for the further development of solar energy in Ukraine are singled out. The method of estimating the economic efficiency of using solar power plants is proposed, which allows to quantify the possibilities of using solar energy. The algorithm of choice of structure and complete set of solar power stations is developed.

**Keywords:** solar energy, solar system, photovoltaic modules, electric energy, solar collectors, «green» tariff, coefficient of efficiency, payback period. **Вступ.** Сонячна енергія впевнено займає стійкі позиції у світовій енергетиці. До істотних переваг її широкого застосування відноситься те, що сонячна енергія є екологічно чистим джерелом, це дозволяє використовувати його в зростаючому масштабі без негативного впливу на навколишнє середовище. Сонячна енергія – це практично невичерпне джерело енергії, яке доступне в кожній точці нашої планети.

В даний час для теплопостачання та вироблення електричної енергії величезними темпами витрачаються органічні види палива. Однак в сучасному світі їх використання пов'язане з виникненням ряду проблем: постійним зростанням цін, залежністю від поставок, високими експлуатаційними витратами на обладнання, забрудненням навколишнього середовища.

Одним з ефективних шляхів вирішення цієї проблеми є використання відновлюваних джерел енергії. У світі цьому питанню давно приділяється багато уваги [1–3]. Станом на 2017 рік, за даними аналітичної компанії IHS Markit, загальна потужність об'єктів сонячної енергетики в світі досягла 301 ГВт.

Лідером за встановленою потужністю геліоустановок є Євросоюз, серед окремих країн – Китай. У Китаї встановлено фотоелектричних установок сумарною потужністю понад 15 ГВт. В Японії на сьогоднішній день загальна встановлена потужність геліоустановок становить понад 10 ГВт, у

США – понад 9,8 ГВт. У країнах Євросоюзу встановлено фотоелектричних установок загальною потужністю понад 8,5 ГВт, з яких майже половина припадає на Великобританію, на другому місці знаходиться Німеччина, для якої встановлена потужність геліоустановок становить понад 1,4 ГВт, в той же час за сукупною потужністю геліоустановок на душу населення Німеччина є світовим лідером [4–7].

Не стала винятком і Україна, в якій застосування енергії сонця з кожним роком набирає все більше популярності. Загальна встановлена потужність об'єктів відновлюваної енергетики в Україні становить 1492 МВт, з них 56% (839 МВт) – це об'єкти сонячної енергетики.

Взяті Україною зобов'язання в частині зниження впливу енергетики на довкілля обумовлюють потребу у додаткових обсягах інвестицій [8]. Пріоритетом у цьому напрямку буде обмеження викидів парникових газів великими паливоспалювальними установками, що можливо досягнути за рахунок реалізації комплексу заходів з енергоефективності,

енергозбереження та розширення використання відновлюваної енергетики.

До основних цільових параметрів на період до 2035 року згідно [8] віднесено оптимізацію структури енергетичного балансу держави, виходячи з вимог енергетичної безпеки та забезпечення частки відновлюваної енергетики на рівні 20%. Значна частка в цьому секторі відводиться сонячній енергетиці.

У той же час, зростання виробництва електроенергії на базі відновлюваних джерел енергії на основі вітрової та сонячної енергетики обмежуватиметься можливістю електроенергетичної системи компенсувати коливання їх потужності та рівнем економічного навантаження на споживача. При цьому розширення даних видів генерації безпосередньо у споживача не підпадає під обмеження енергосистеми і формує перспективу динамічного розвитку на місцевому рівні, оскільки геліоустановки є джерелом розподіленої генерації (ДРГ) [8].

Перевагою електричних мереж із ДРГ є можливість використання острівних режимів [9], які полягають в тому, що при відключенні живлення від енергосистеми ДРГ переходять в автономний режим роботи на власне навантаження. Відповідно до існуючих стандартів [10] переключення ДРГ на автономне навантаження або їх відключення повинно відбуватися протягом 100-300 мс. При зростанні потужностей ДРГ та підвищенні рівня автоматизації електричних мереж існуюча практика відключення ДРГ при пошкодженнях в живлячій мережі вже не буде доцільним рішенням. Отже, ДРГ можуть розглядатися, як один з можливих видів резервування.

Використання ДРГ в електричних мережах може значно підвищити ефективність забезпечення споживачів електричною енергією, але одночасно це створює й нові проблеми, пов'язані із втручанням в режими роботи існуючих електричних систем, що потребує цілеспрямованого управління нормальними та післяаварійними режимами роботи таких мереж.

Таким чином, дослідження особливостей впровадження сонячних електростанцій (СЕС) та їх впливу на роботу електроенергетичних систем є актуальною і досить важливою задачею для електроенергетики України.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Велика кількість світових та вітчизняних наукових робіт присвячена геліоенергетиці. Більшість із них висвітлює стан розвитку геліоенергетики [1-3], особливості впровадження та експлуатації геліоустановок [9-11], оцінює загальний потенціал геліоенергетики [4, 6, 7]. Значна кількість публікацій досліджує перспективи розвитку [5, 12], зміну показників якості електроенергії при впровадженні СЕС [13] тощо. У зв'язку з цим особливо важливими стають питання дослідження економічності роботи таких установок та кількісної оцінки перспектив доцільності вироблення сонячної енергії геліоустановками.

**Мета статті.** Дослідити основні особливості впровадження СЕС в Україні та оцінити економічну

ефективність вироблення сонячної енергії геліоустановками.

**Основні матеріали дослідження.** Потенціал сонячної енергії в Україні є достатньо високим для широкого впровадження геліосистем практично на всій території. Сонячне випромінювання в Україні становить 3500–5200 МДж/м<sup>2</sup> на рік [14]. Сезонний період для активного використання сонячної енергії в північних регіонах триває з квітня по вересень, а в південних з березня по жовтень, що становить 1900–2400 год/рік. Загальне середньорічне сонячне випромінювання варіюється від 1070 кВт·год/м<sup>2</sup> в північних районах України до 1400 кВт·год/м<sup>2</sup> на півдні країни. За рівнем інтенсивності сонячного випромінювання (радіації) на території України необхідно виділити чотири зони, які показані на рис. 1.

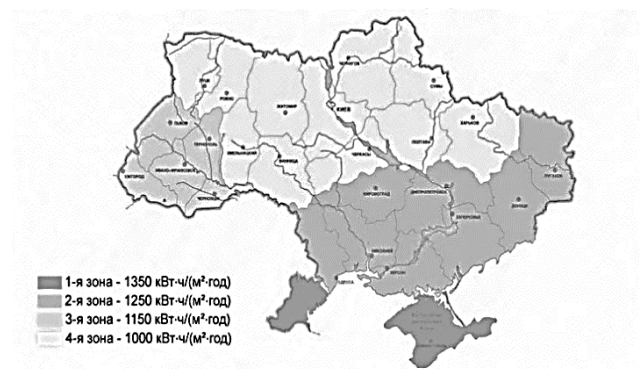


Рис. 1 – Зони інтенсивності сонячного випромінювання в Україні.

У першій і другій зонах знаходяться всі південні області України, більше половини території нашої країни знаходяться в третій зоні, четверта зона найменш придатна для використання сонячної енергії. В цілому територія України належить до зон з середньою інтенсивністю сонячної радіації. В реальних умовах величина щільності прямої і дифузійної сонячної радіації залежить від широти місцевості, прозорості атмосфери, характеристик земної поверхні, а також від часу доби і пори року. З цієї причини величина річного потрапляння сонячної радіації на 1 м<sup>2</sup> з поверхні землі істотно варіюється для різних регіонів України і має статичний характер розподілу [15].

Знаючи статистику сонячної радіації за декілька років, ми маємо можливість спрогнозувати вироблення електроенергії СЕС в різних регіонах України. Середній місячний рівень сонячної радіації в містах України (середній показник за останні 22 роки за даними NASA) наведено в табл. 1.

Кількість енергії, що виробляється фотоелектричним модулем протягом дня, розраховується за формулою [16]:

$$W_{\text{Е/Е}}^{\text{ФЕМ}} = P_{\text{ФЕМ}} \cdot \eta_{\text{ФЕМ}} \cdot \eta_{\text{гФЕМ}}, \quad (1)$$

де  $P_{\text{ФЕМ}}$  – номінальна потужність фотоелектричного модуля;

$k_{\text{ФЕМ}}$  – коригувальний коефіцієнт, що дорівнює 0,7 влітку і 0,5 в зимовий період, він робить поправку на втрату потужності сонячних елементів при нагріванні на сонці, а також враховує похибе падіння променів на поверхню модулів протягом дня;

$T_{h\text{ФЕМ}}$  – кількість пікових годин, тобто умовний час, протягом якого сонце світить з інтенсивністю 1000 Вт/м<sup>2</sup>, визначається як:

$$T_{h\text{ФЕМ}} = \frac{E_{\text{Cl}}^{\text{cc}}}{1000}, \quad (2)$$

де  $E_{\text{Cl}}^{\text{cc}}$  – середньодобове значення інтенсивності сонячного випромінювання в даному місяці;

1000 – інтенсивність світлового випромінювання при стандартних умовах випробувань фотоелектричних панелей.

Таблиця 1 – Інтенсивність сонячного випромінювання на території України, кВт·год./м<sup>2</sup>/день

Регіони/Місяці	Січ.	Лют.	Бер.	Кв.	Тр.	Чер.	Лип.	Сер.	Вер.	Жов.	Лис.	Гр.	Серед. показ.
Вінниця	1,07	1,89	2,94	3,92	5,19	5,3	5,16	4,68	3,21	1,97	1,10	0,9	<b>3,11</b>
Луцьк	1,02	1,77	2,83	3,91	5,05	5,08	4,94	4,55	3,01	1,83	1,05	0,79	<b>2,99</b>
Дніпро	1,21	1,99	2,98	4,05	5,55	5,57	5,70	5,08	3,66	2,27	1,20	0,96	<b>3,36</b>
Донецьк	1,21	1,99	2,94	4,04	5,48	5,55	5,66	5,09	3,67	2,24	1,23	0,96	<b>3,34</b>
Житомир	1,01	1,82	2,87	3,88	5,16	5,19	5,04	4,66	3,06	1,87	1,04	0,83	<b>3,04</b>
Ужгород	1,13	1,91	3,01	4,03	5,01	5,31	5,25	4,82	3,33	2,02	1,19	0,88	<b>3,16</b>
Запоріжжя	1,21	2,00	2,91	4,20	5,62	5,72	5,88	5,18	3,87	2,44	1,25	0,95	<b>3,44</b>
Івано-Франківськ	1,19	1,93	2,84	3,68	4,54	4,75	4,76	4,40	3,06	2,00	1,20	0,94	<b>2,94</b>
Київ	1,07	1,87	2,95	3,96	5,25	5,22	5,25	4,67	3,12	1,94	1,02	0,86	<b>3,10</b>
Кропивницький	1,20	1,95	2,96	4,07	5,47	5,49	5,57	4,92	3,57	2,24	1,14	0,96	<b>3,30</b>
Луганськ	1,23	2,06	3,05	4,05	5,46	5,57	5,65	4,99	3,62	2,23	1,26	0,93	<b>3,34</b>
Львів	1,08	1,83	2,82	3,78	4,67	4,83	4,83	4,45	3,00	1,85	1,06	0,83	<b>2,92</b>
Миколаїв	1,25	2,10	3,07	4,38	5,65	5,85	6,03	5,34	3,93	2,52	1,36	1,04	<b>3,55</b>
Одеса	1,25	2,11	3,08	4,38	5,65	5,85	6,04	5,33	3,93	2,52	1,36	1,04	<b>3,55</b>
Полтава	1,18	1,96	3,05	4,00	5,40	5,44	5,51	4,87	3,42	2,11	1,15	0,91	<b>3,25</b>
Рівне	1,01	1,81	2,83	3,87	5,08	5,17	4,98	4,58	3,02	1,87	1,04	0,81	<b>3,01</b>
Суми	1,13	1,93	3,05	3,98	5,27	5,32	5,38	4,67	3,19	1,98	1,10	0,86	<b>3,16</b>
Тернопіль	1,09	1,86	2,85	3,85	4,84	5,00	4,93	4,51	3,08	1,91	1,09	0,85	<b>2,99</b>
Харків	1,19	2,02	3,05	3,92	5,38	5,46	5,56	4,88	3,49	2,10	1,19	0,9	<b>3,26</b>
Херсон	1,30	2,13	3,08	4,36	5,68	5,76	6,00	5,29	4,00	2,57	1,36	1,04	<b>3,55</b>
Хмельницький	1,09	1,86	2,87	3,85	5,08	5,21	5,04	4,58	3,14	1,98	1,10	0,87	<b>3,06</b>
Черкаси	1,15	1,91	2,94	3,99	5,44	5,46	5,54	4,87	3,40	2,13	1,09	0,91	<b>3,24</b>
Чернігів	0,99	1,80	2,92	3,96	5,17	5,19	5,12	4,54	3,00	1,86	0,98	0,75	<b>3,03</b>
Чернівці	1,19	1,93	2,84	3,68	4,54	4,75	4,76	4,40	3,06	2,00	1,20	0,94	<b>2,94</b>

Кількість теплової енергії,  $Q_{\text{Т/Е}}^{\text{СК}}$  кВт·год, яку можна отримати за день при роботі сонячних колекторів (СК), визначається за формулою [16]:

$$Q_{\text{Т/Е}}^{\text{СК}} = F_{\Sigma}^{\text{СК}} \cdot \eta_{\text{Cl}}^{\text{cc}} \cdot \eta_{\text{СК}} \cdot \frac{1}{k_{\text{op}}}, \quad (3)$$

де  $F_{\Sigma}^{\text{СК}}$  – сумарна площа геліополя;

$$F_{\Sigma}^{\text{СК}} = F_{\text{СК}} \cdot n_{\text{СК}}, \quad (4)$$

де  $F_{\text{СК}}$  – площа одного СК;

$n_{\text{СК}}$  – кількість СК;

$E_{\text{Cl}}^{\text{cc}}$  – середньодобове значення інтенсивності сонячного випромінювання в даному місяці;

$\eta_{\text{СК}}$  – коефіцієнт поглинання (технічна характеристика СК);

$k_{\text{op}}$  – поправочний коефіцієнт ефективності використання СК, що враховує кут установки

колектора відносно горизонту і орієнтацію колектора відносно сторін світу.

Слід зазначити, що сонячна тепла технологія економічніша, ніж фотоелектричні СЕС, а досягнута ефективність становить не менше 50% [16].

Для оцінки потенційних можливостей вироблення електричної енергії СЕС в Україні був розрахований середній річний рівень сонячної радіації за 2017 рік та кількість електричної енергії, яка виробляється фотоелектричною системою потужністю 11 кВт за рік. Ці дані представлені у табл. 2.

Таблиця 2 – Данні про виробництво електроенергії СЕС в різних містах України за 2017 р.

Місто	Середній річний рівень сонячної радіації, кВт·год./м <sup>2</sup> /день	Кількість електричної енергії, яка виробляється фотоелектричною системою за рік, МВт·год.
Харків	3,03	8,09
Луганськ	3,31	8,76
Суми	3,12	8,28
Запоріжжя	3,52	9,27
Мелітополь	3,77	9,91
Полтава	3,29	8,69
Кропивницький	3,43	9,05
Чернігів	2,93	7,78
Київ	3,08	8,18
Одеса	3,74	9,85
Вінниця	3,17	8,39
Львів	2,99	7,87
Ужгород	3,11	8,16

СЕС представляє собою інженерну споруду, яка служить для перетворення сонячної радіації в електричну енергію. Використовують різні способи перетворення сонячної радіації, від яких залежить конструкція СЕС.

Конструктивно СЕС бувають двох видів: фотоелектричні (безпосередньо перетворюють сонячну енергію в електроенергію з допомогою фотоелектричного модулю) та термодинамічні (перетворюють сонячну енергію в теплову, а потім в електричну; потужність термодинамічних СЕС вище, ніж потужність фотоелектричних станцій).

До елементів СЕС відносяться:

1. фотоелектричні панелі (сонячні модулі), які перетворюють сонячну енергію в електричну, використовуючи фотовольтаїчний ефект;

2. контролер для управління сонячною фотоелектричною системою, який не допускає перевантаження системи або зворотного струму в нічний час;

3. акумулятор, який потрібен для накопичення електроенергії, що генерується сонячними модулями;

4. інвертор, що перетворює постійний електричний струм від сонячних батарей в змінний, який необхідний для живлення електроприладів;

5. електричний лічильник, що фіксує кількість електроенергії, яка подається в загальну мережу або споживається з неї при необхідності.

На рис. 2 представлена схема СЕС, яка демонструє взаємозв'язок усіх елементів станції та основний принцип її роботи.

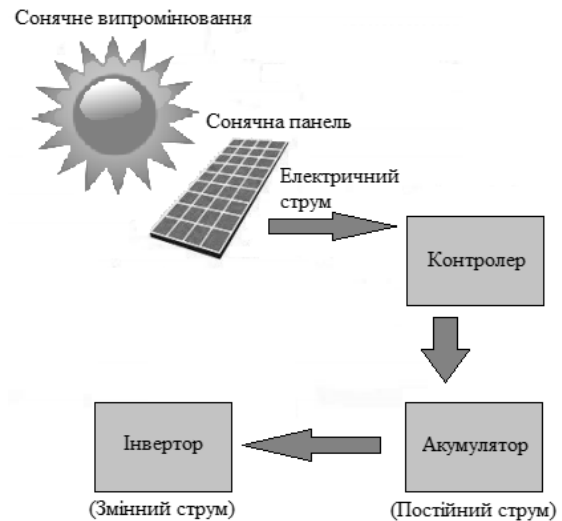


Рисунок 2 – Схема роботи СЕС

СЕС можуть бути двох типів:

- мережеві, які є більш потужними, вони підключаються до зовнішньої електричної мережі, більшість виробленої ними електричної енергії передається в мережу через окремий лічильник, величина навантаження власного споживання незначна;

- автономні, які призначені в першу чергу покривати потреби навантаження власного споживання, тому вони розраховуються на меншу потужність (що визначається переліком власних електроприймачів), вони також підключаються до зовнішньої електричної мережі і лише надлишки електричної енергії передають в мережу через окремий лічильник.

Завдяки діючому в Україні законодавству громадяни нарівні з організаціями можуть продавати енергію, що генерується їх альтернативним джерелом, за спеціальними «зеленим» тарифом [17], який являє собою тарифну сітку, згідно з якою уряд від імені державної компанії «Енергоринок» набуває у комерційних організацій і приватних осіб електричну енергію, генеровану із застосуванням відновлювальних джерел за високими цінами.

Такий тариф на сонячну електроенергію забезпечує можливість оптимальної експлуатації конструкцій СЕС для постачання електроенергії до житлових будівель і підвищення їх рентабельності. Впровадження «зеленого» тарифу стало також потужним стимулом для розвитку промислової генерації фотоелектричних продуктів в Україні.

Активне впровадження СЕС у світі стимулює інтенсивний розвиток ринку комплектуючих для СЕС. Сьогодні великий попит мають китайські фотоелектричні панелі, так як їх вартість на порядок нижче, ніж системи виробництва США та Європи. Також свою продукцію на ринку пропонують виробники Японії, оцінна вартість якої тримається на одному рівні з європейськими та американськими конкурентами. Серед провідних виробників сонячних

модулів, які зарекомендували себе завдяки якості продукції та значній кількості поставок, слід відмітити наступних: Abi-Solar, Panasonic (SolarCity), Viessmann, Jinko Solar, Trina Solar, Canadian Solar, JA Solar, Hanwa Q CELLS, Yingli Green Energy (YGE), First Solar та інші.

Перше місце за обсягом поставок сонячних панелей зайняла китайська компанія JinkoSolar з результатом 6,6-6,7 ГВт, яка посунула на друге місце колишнього лідера, також китайську компанію Trina Solar (6,3-6,55 ГВт). На третьому місці знову китайська компанія (але з канадською назвою) Canadian Solar (5,073-5,173 ГВт). Четверте місце зайняла компанія JA Solar, також з Китаю з об'ємом поставок 4,9-5 ГВт. На п'ятому місці - корейська Hanwha Q Cells (4,8-5 ГВт), на шостому - китайська GCL System Integration Technology (4,6-5 ГВт). Американська компанія First Solar посіла сьоме місце (2,8-2,9 ГВт поставлених сонячних модулів).

Вітчизняні виробники у світовому рейтингу конкурувати не в змозі, але вони також представлені на ринку України значною кількістю продукції. Серед найбільш відомих з них є ПАО «Квазар» (м. Київ), ЗАО «Пілар» (м. Київ), Prolog Semikor LLC (м. Київ), ТОВ «Сілікон» (Світловодськ Кіровоградської обл.). Плоскі сонячні колектори для гарячого водопостачання в Україні випускає тільки компанія «Сінтек» (Запоріжжя) під ТМ SintSolar.

Тобто на сьогоднішній день ринок геліоенергетики в Україні широко забезпечений комплектуючими для СЕС і надає можливість задовольнити досить вибагливі вимоги до комплектації СЕС, які вводяться в експлуатацію.

#### Економічна ефективність використання СЕС.

Ефективності та доцільності використання сонячної енергії в Україні присвячено багато досліджень. Коефіцієнт корисної дії СЕС непостійний і залежить від декількох факторів. Головний з них – інтенсивність і тривалість інсоляції, яка, в свою чергу, визначається погодними умовами, тривалістю дня і ночі, тобто широтою місцевості. Величезне значення має і тип встановлених сонячних батарей.

Економічна ефективність використання СЕС визначається величиною чистого дисконтованого доходу, який пропонується застосовувати в якості коефіцієнта економічної ефективності використання установки і розраховується за виразом:

$$K_{\text{еф}} = \text{ЧДД} = \sum_{t=1}^T \frac{D_t}{(1+E)^t} - K_n, \quad (5)$$

де  $D_t$  – дохід, що одержаний за рік  $t$ ;

$K_n$  – капіталовкладення, наведені в часі до початку розрахункового періоду;

$E$  – прийнята процентна ставка (норма дисконту).

Річний інвестиційний дохід визначається за виразом:

$$D = \text{ЧП} + V_{\text{ан}}, \quad (6)$$

де ЧП – приріст чистого прибутку (ЧП);

$V_{\text{ан}}$  – витрати на амортизацію нового обладнання.

Приріст ЧП визначається з урахуванням податку на прибуток і на майно:

$$\text{ЧП} = (\Pi - \text{ПМ}) \cdot \left(1 - \frac{C_{\text{пп}}}{100}\right), \quad (7)$$

де  $\Pi$  – прибуток;

$C_{\text{пп}}$  – діюча ставка податку на прибуток, %;

$\text{ПМ}$  – податок на майно.

Прибуток при впровадженні СЕС визначається наступним чином:

$$\Pi = \Delta E - V_e, \quad (8)$$

де  $\Delta E$  – вартість зекономлених ресурсів;

$V_e$  – поточні витрати, пов'язані з експлуатацією нових технічних засобів.

Поточні витрати становлять:

$$V = V_{\text{ан}} + V_{\text{рон}}, \quad (9)$$

де  $V_{\text{ан}}$  – витрати на амортизацію нового обладнання;

$V_{\text{рон}}$  – витрати на ремонт та обслуговування нового обладнання.

Складові поточних витрати визначаються наступним чином:

$$V_{\text{ан}} = \alpha_a \cdot K_n, \quad (10)$$

$$V_{\text{рон}} = \alpha_{\text{ро}} \cdot K_n, \quad (11)$$

де  $\alpha_a$  – норма відрахувань на амортизацію обладнання;

$\alpha_{\text{ро}}$  – норма відрахувань на ремонт та обслуговування обладнання;

$K_n$  – капіталовкладення в нове обладнання.

Дисконтування капіталовкладень здійснюється наступним чином:

$$K_n = \sum_{t=0}^{T_{\text{стр}}} \frac{K_t}{(1+E)^t}, \quad (12)$$

де  $K_t$  – капіталовкладення в спорудження установки за рік  $t$ ;

$T_{\text{стр}}$  – тривалість спорудження установки в роках.

Капіталовкладення в спорудження установки  $K_t$  визначаються як сума капіталовкладень в будівельні конструкції  $K_{\text{бк}}$ , капіталовкладень в окремі елементи СЕС  $K_{\text{об}}$  та супутніх капіталовкладень, які включають передвиробничі витрати на передінвестиційні дослідження, проектування та розробку техніко-економічного обґрунтування, тощо  $K_{\text{суп}}$ :

$$K = K_{\text{бк}} + K_{\text{об}} + K_{\text{суп}}. \quad (13)$$

Термін окупності при цьому становить:

$$T_o = \frac{K}{D_t} \quad (14)$$

Критерієм економічної ефективності використання СЕС є максимум чистого дисконтованого доходу :

$$K_{\text{ефі}} \rightarrow \max. \quad (15)$$

Запропонований критерій економічної ефективності дозволить обґрунтувати доцільність використання СЕС.

Алгоритм вибору СЕС передбачає послідовне виконання розрахунків та порівнянь, необхідних для обґрунтованого визначення структури СЕС та її комплектуючих. Розроблений алгоритм вибору СЕС представлено на рис. 3.

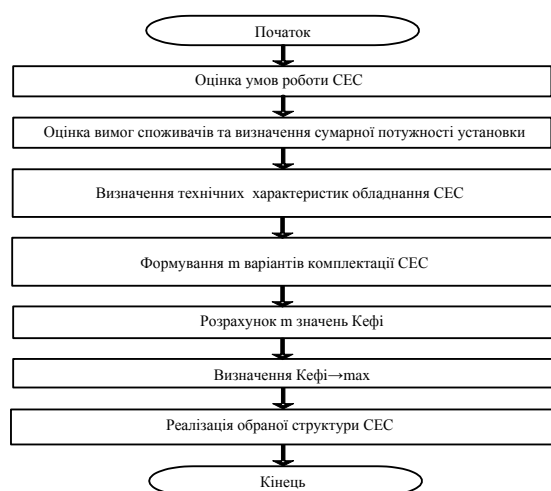


Рисунок 3 – Алгоритм вибору СЕС

Для прикладу був розглянутий варіант побудови СЕС для автономного живлення будівлі, розташованої на південній території Харківської області. Характеристика навантаження такої будівлі представлена у табл. 3.

Таблиця 3 – Характеристика навантаження будівлі для живлення від СЕС

Споживачі енергії	Кількість, шт.	Потужність, кВт	Загальна потужність, кВт
Холодильник	1	1	1
Телевізор	4	0,08	0,32
Пральна машина	1	2,5	2,5
Електрочайник	1	2,2	2,2
Персональний комп'ютер	2	0,3	0,6
Пилосос	1	0,8	0,8
Праска	1	2	2
Мікрохвильова піч	1	1	1
Освітлення	20	0,02	0,4
Інші прилади	1	0,15	0,15
<b>Загалом, кВт.</b>		<b>10,97</b>	

Використовуючи викладену методику розрахунку, було складено декілька варіантів побудови СЕС та визначений найбільш ефективний з них. Результати розрахунку представлені в табл. 4.

Таблиця 4 – Результати розрахунку різних варіантів СЕС

Варіант	Обладнання	K, дол.	D <sub>t</sub> , дол.	T <sub>o</sub> , років	K <sub>ефі</sub>
1	Perlight PLM 270P-60 InfiniSolar 3P 10 кВт. ATABA NP-12-200	11616	1221	9,5	1704
2	Risen RSM60-6-270P Growatt 10000 HY Altek 6FM200AGM	12481	1221	10,2	839
3	Altek ALM-265P InfiniSolar 3P 10 кВт. ALVA AD12-200 AGM	11841	1221	9,7	1479
4	KV7-270P InfiniSolar 3P 10 кВт. ATABA NP-12-200	12870	1221	10,5	450
5	Perlight Solar PLM-280M Growatt 10000 HY Ventura GPL 12-200	13375	1221	10,9	-55

Для практичної реалізації було обрано варіант 1, оскільки для нього K<sub>ефі</sub> має найбільше значення з усіх розглянутих.

Для прийнятого варіанту СЕС визначаємо індекс дохідності за виразом

$$ID = \frac{ЧДД}{K_H} + 1. \quad (16)$$

Для розглянутої мережі ID = 1,15, що свідчить про гарні перспективи впровадження розробленого проекту СЕС.

На рис. 4 представлено графік терміну окупності проекту введення в експлуатацію запропонованої СЕС.

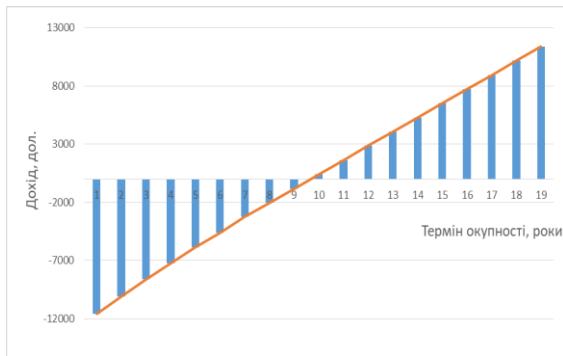


Рисунок 4 – Графік терміну окупності проекту введення в експлуатацію СЕС

Результати остаточного вибору комплектуючих для СЕС представлені в табл. 5.

Таблиця 5 – Вибір комплектуючих для СЕС

Назва обладнання	Характеристики	Кількість
Сонячний модуль Perlright	Тип кремнію: полікристал. Клас фотомодулю: "А". Номінальна потужність: 270 Вт. Напруга при макс. потужності: 31.22 В. Струм при макс. потужності: 8.65 А. Струм короткого замикання: 9.13 А. Напруга холостого ходу: 38.23 В. Розміри: 1640x992x35 мм.	38
Гібридний інвертор InfiniSolar 10 кВт	Макс. потужність сонячної електростанції, що підключається: 14850 Вт. Діапазон напруг відстеження точки макс. потужності: 400-800 В. 2 МРРТ трекара. Безтрансформаторний. 3-фази. Клас захисту IP 65	1
Акумуляторна батарея 200 А·год., 12 В	Батарея акумуляторна 12 В 200А·год, 331 * 175 * 216 мм.	5

Розроблена СЕС призначена для зниження витрат на споживання електроенергії з мережі та генерації в електричну мережу з наступним продажем за «зеленим» тарифом, а також для резервування споживачів на випадок відключення основної мережі з запасом енергії від 12 кВт·год. в акумуляторному блоці.

Представлене рішення є досить ефективним для установки на житловому будинку, на котеджному або дачному будинку при виробництві з середньодобовим споживанням від 5 кВт·год. на добу.

#### Висновки:

1. Проведений аналіз сучасного стану та перспектив розвитку геліоенергетики в Україні свідчить про позитивні напрямки та тенденції успішного розвитку сонячної енергетики, законодавчо закріплені та втілювані на державному рівні.

2. Аналіз зміни структури генеруючих потужностей в Україні показує збільшення долі відновлюваної енергетики в загальному виробництві

електричної енергії, значна частка в цьому секторі відводиться сонячній енергетиці.

3. Оцінка потенціальних можливостей вироблення електричної енергії СЕС, розташованими на території України, та аналіз сучасного ринку геліоенергетики доводять широкі можливості побудови різноманітних за структурою СЕС.

4. Розроблений алгоритм вибору СЕС дозволяє обґрунтовано приймати рішення щодо структури та комплектації СЕС, впроваджуваних в експлуатацію.

5. Запропонована методика оцінки економічної ефективності використання СЕС дозволяє кількісно оцінити можливості та перспективи доцільності вироблення сонячної енергії розробленими установками і може бути використана для характеристики сучасних інвестиційних проектів, присвячених розвитку геліоенергетики.

#### Список літератури

1. Обзор отрасли солнечной энергетики от Nitol Solar Limited. – Режим доступу: <http://www.nitolsolar.com/ru/industryfacts/>
2. Sen, Z. Solar energy in progress and future research trends // Progress in Energy & Combustion Science. – 2004. – V. 30. – P. 367-416.
3. World energy assessment: energy and the challenge of sustainability/ United Nations Development Programme – NY- [edited by Jose Goldemberg ], p. 235-247.
4. Атлас енергетичного потенціалу відновлених та нетрадиційних джерел енергії. – К.: Изд. Института возобновляемой энергетики НАН Украины, 2005. – 44 с.
5. Шкурупская И.А. Оценка перспектив развития гелиоэнергетики в Украине. – Режим доступу: [http://www.confcontact.com/2008febr/6\\_shkurup.php](http://www.confcontact.com/2008febr/6_shkurup.php)
6. Дюжев, В. Г. Роль комплексной социально-экономической и природоохранной оценки потенциала энергосберегающих инноваций в повышении их инновационной восприимчивости для предприятий и организаций Украины / В. Г. Дюжев, С. В. Сусликов // Вісник Національного політехнічного університету «Харківський політехнічний інститут». Технічний прогрес і ефективність виробництва. – 2008. – № 21.
7. Сусликов, С.В. Совершенствование метода прогнозирования изменения стоимости энергоресурсов в рамках расчета эффективности внедрения технологий гелиоэнергетики / С.В. Сусликов // Энергобережения. Энергетика. Энергоаудит. – Харків : НТУ «ХПИ». – 2011. – № 6. – С. 63–67.
8. Міністерство енергетики та вугільної промисловості України. Проект оновленої «Енергетичної стратегії України на період до 2035 року». [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/n0002120-13>
9. Mahat P. Control and Operation of Islanded Distribution System / Mahat P. – Aalborg: Aalborg University, 2010. – 174 p.
10. IEEE 1547. Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems. – Режим доступу: <http://grouper.ieee.org/groups/scc21/1547/1547index.html>
11. Кириленко О. В. Технічні аспекти впровадження джерел розподільної генерації в електричних мережах / Кириленко О. В., Павловський В. В., Лук'яненко Л. М. // Технічна електродинаміка. – 2011. – №1. – С. 46–51.
12. Стребков Д.С. Перспективы развития возобновляемой энергетики / Д.С. Стребков // Труды международной научно-технической конференции энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве. – 2012. – С. 3-13.
13. Бацала Я.В., Гладь І.В., Николин У.М. Аналіз показників якості електроенергії сонячної електростанції / Я.В. Бацала, І.В. Гладь, У.М. Николин // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2013. – № 4(49). – С. 81-90.
14. Калиниченко, В. А. Возобновляемые источники энергии / В. А. Калиниченко, Р. Титко. – Варшава – Краков – Полтава, 2010. – 525 с.
15. Дудюк, Д. Л. Нетрадиционная возобновляемая энергетика / Д. Л. Дудюк, С. С. Мазепа. Львов, 2009. – 188 с.



16. Немировский И.А. Современные источники энергии: учебное пособие / И.А. Немировский. – Х.: НТУ «ХПИ», 2015. – 167 с.

17. Закон України від 04.06.2015 № 514-19 Про внесення змін до деяких законів України щодо забезпечення конкурентних умов виробництва електроенергії з альтернативних джерел енергії / Відомості Верховної Ради України (ВВР). – 2015. – № 33. – С.324. – Режим доступу: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/514-19>.

#### References (transliterated)

1. Overview of the solar industry from Nitols Solar Limited. - Rezhyim dostupu: <http://www.nitolsolar.com/enindustryfacts/>

2. Sen, Z. Solar energy in progress and future research trends // Progress in Energy & Combustion Science. - 2004. - V. 30. - P. 367-416.

3. World energy assessment: energy and the challenge of sustainability / United Nations Development Programme - NY- [edited by Jose Goldemberg], p. 235-247.

4. The Atlas of the energetic potential of visions and non-traditional dzherel energies. - K.: Ed. Institute of Renewable Energy NAS of Ukraine, 2005. - 44 p.

5. Shkurupskaya I.A. Evaluation of the prospects for the development of solar energy in Ukraine. - Rezhyim dostupu: [http://www.confcontact.com/2008febr/6\\_shkurup.php](http://www.confcontact.com/2008febr/6_shkurup.php)

6. Dyuzhev, VG The role of a complex socio-economic and environmental assessment of the potential of energy-saving innovations in enhancing their innovative susceptibility for Ukrainian enterprises and organizations / VG Dyuzhev, SV Suslikov // News of the National Polytechnic University Kharkiv Polytechnical Institute ". *Tekhnicheskyy pro-gres i effektivnist vibrobitytva*. - 2008. - № 21.

7. Suslikov, S.V. Perfection of the method of forecasting changes in the cost of energy resources in the context of calculating the efficiency of the introduction of solar energy technologies / S. V. Suslikov // *Energoz-berezhennya. Energy. Energoaudit*. - Khar'k: NTU "KhPI". - 2011. - № 6. - P. 63-67

8. Ministry of Energy and Vocational Promi-word of Ukraine. The project of the "Energetic Strategy of Ukraine for the period up to 2035".

[The electronic resource]. - Rezhyim dostupu: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/n0002120-13>

9. Mahat P. Sontrol and Operation of Islanded Distribution System / Mahat P. - Aalborg: Aalborg University, 2010. - 174 p.

10. IEEE 1547. Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems. - Rezhyim dostupu: [http://qrouper.ieee.org/groups/scc21/tysyachi\\_p'yat-sot\\_sorok\\_sim/1547index.html](http://qrouper.ieee.org/groups/scc21/tysyachi_p'yat-sot_sorok_sim/1547index.html)

11. Kyrylenko O. V. Tekhnichni aspekty Vprovadzhennya dzherel rozpodil'noyi heneratsiyi v elektrychnykh merezh. / Kyrylenko O. V., Pavlovskyy V. V., Luk'yanenko L. M. // *Tekhnichna elektrodinamika*. - 2011. - №1. - P. 46-51.

12. Strebkov DS Prospects for the development of renewable energy / DS. Strebkov // Works of the International Scientific and Technical Conference Energy Supply and Energy Saving in Agriculture. - 2012. - P. 3-13.

13. Batsa Y.A.V., Hlad' I.V., Nykolyn U.M. Analiz pokaznykiv yakosti elektroenerhiyi Sonyachnoyi elektrostantsiyi / Y.A.V. Batsan, I.V. Hlad', U.M. Nykolyn // *Rozvidka ta rozrobka naftovykh y hazovykh rodovyshe*. - 2013. - № 4 (49). - P. 81-90.

14. Kalinichenko, VA Renewable sources of energy / VA Kalinichenko, R. Titko. - Warsaw - Krakow - Poltava, 2010. - 525 p.

15. Dudyuk, DL Unconventional renewed energy / DL Duduk, SS Mazepa. Lviv, 2009. - 188 p.

16. Nemirovsky IA Modern sources of energy: a textbook / IA. Nemirovsky. - H.: NTU "KhPI", 2015. - 167 p.

17. Zakon Ukrayiny vid 04.06.2015 № 514-19 Pro vnesennya zmin do deyaky Zakoniv Ukrayiny otnosytel'no zabezpechennya konkurentnykh umov vyrobnytstva elektroenerhiyi z al'ternatyvnykh dzherel enerhiyi / Vidomosti Verkhovnoyi Rady Ukrayiny (VVR). – 2015. – № 33. – P. 324. – Rezhyim dostupu: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/514-19>.

Надійшло (received) 18.01.2018

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Довгальок Оксана Миколаївна (Довгальок Оксана Николаевна, Dovgalyuk Oksana Mykolayivna)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри передачі електричної енергії, м. Харків; тел.: (057) 707-62-46; e-mail: [Dovgalyuk\\_O@kpi.edu.ua](mailto:Dovgalyuk_O@kpi.edu.ua).

**Безкостний Павло Ігорович (Безкостный Павел Игоревич, Bezkostnyi Pavlo Igorovich)** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент; тел.: (096) 227-18-00; e-mail: [bezkostniy@ukr.net](mailto:bezkostniy@ukr.net).

Укладач: С. О. Федорчук, аспірант.